

물질 보간 기법을 기반한 다층/다물질 음향 패널의 전달손실 최대화

Sound Transmission Loss Maximization of Multi-medium Multilayered Acoustic Panels Using a Material Interpolation Scheme

김윤재† · 김은일* · 김윤영**

Yoon Jae Kim, Eun Il Kim and Yoon Young Kim

1. 서 론

두 음향 공간 사이의 음향 전파를 차단하기 위하여 사용되는 차음벽은 주로 다층/다물질로 구성된 음향벽이 이용되며 건축 구조물의 벽이나 자동차의 데쉬보드의 방음 구조물을 대표적 예로 들 수 있다. 이러한 구조물을 설계함에 있어 기존에는 주로 실험적 방법에 기초한 평가/설계가 이루어졌다. 그러나 유효한 재료의 양이 제한되고 물리적으로 상이한 다물질이 설계에 이용되는 상태에서 이러한 접근법은 비효율적일 수 있으며, 기존과 다른 최적화 방법에 기초한 체계적인 설계방법이 요구된다.

본 연구에서는 다층/다물질로 구성된 음향벽의 설계 문제에 물질 보간 기법에 기초한 최적화 기법을 적용하고 음향벽이 노출되는 실제적 소음 환경을 고려하기 위하여 Figure 1 과 같이 음장 입사를 고려한 다층/다물질 음향벽 설계문제를 다룬다. 또한, 공기, 탄성 및 탄성 다공성 물질로 구성된 다층/다물질 음향벽의 최적설계 통하여 그 타당성을 검증한다.

2. 물질 보간 기법을 통한 다물질 음향층 모델링

2.1 다물질 음향 층 모델링을 위한 전달행렬

전달행렬법은 일차원 음향 문제를 다루는데 있어 사용되는 대표적 방법 중에 하나이다. 그러나, 여러 음향물질들의 음파 전달 특성을 표현하기 위하여 사용되는 전달행렬들은 각 음향 물질의 근본적인 물리적 성질의 차이로 인하여 그 종류에 따라 각

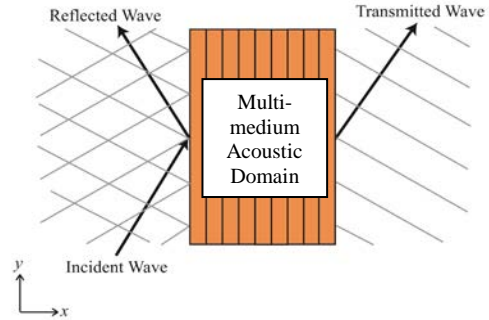


Figure 1 Multi-medium multilayered acoustic domain for layering optimization

전달행렬의 크기가 다르다. 따라서, 기존의 전달행렬법을 통해 본 연구와 같은 최적화 문제를 다룰 경우에 추가적인 기법들이 요구된다. 따라서, 다층/다물질 음향 패널의 효율적 최적 설계를 위해서는 기존과 다른 기법이 요구된다. 본 연구에서는 효율적 최적화를 위하여 물질 보간 기법에 기초한 다물질 음향 전달행렬을 제안한다. 최적화를 위하여 이산화한 각 음향 층마다 두 개의 설계변수를 할당하고 탄성다공성 물질의 물성을 설계변수에 종속적인 물질 보간 함수를 이용하여 탄성다공성 물질의 전달행렬에 기초한 공기, 탄성판에 대한 등가 전달행렬을 구성하였다.

$$\Psi(\chi_1^e, \chi_2^e) = (\chi_1^e)^{q_1} \left[(1 - (\chi_2^e)^{q_2}) (\Psi)_{air} + (\chi_2^e)^{q_2} (\Psi)_{foam} \right] + (1 - (\chi_1^e)^{q_1}) (\Psi)_{elastic} \quad (2)$$

여기서, 기호 χ_1^e 와 χ_2^e 는 e번째 층에 할당된 설계 변수이다. 상첨자 q_1 과 q_2 는 벌칙 계수, 기호 Ψ 는 탄성다공성 물질의 물성들을 나타낸다. 물질 보간 기법이 적용될 물성 Ψ 는 다음과 같이 Biot에 의해 제안된 탄성다공성 물질 모델상의 물성들이다.

$$\Psi = (\phi, \tilde{\rho}_{11}, \tilde{\rho}_{12}, \tilde{\rho}_{22}, \lambda, \mu, K_f) \quad (3)$$

† 교신저자; 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

E-mail : 78strephon@naver.com

Tel : 02-880-1689, Fax : 02-880-5431

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 서울대학교 기계항공공학부, WCU, 교수

식(3)에서 기호 ϕ 는 탄성다공성 물질의 공극률을 의미하며, 탄성다공성 물질의 유효 밀도들은 $\tilde{\rho}_{11}$, $\tilde{\rho}_{12}$ 와 $\tilde{\rho}_{22}$ 로 나타낸다. 기호 λ 와 μ 는 탄성다공성 물질 내 고체상의 Lamé 상수들을 의미하며 K_f 는 탄성다공성 물질 유체상의 체적탄성계수이다.

2.2 전달 손실 최대화 문제의 정식화

앞 절에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 다층/다물질로 이루어진 음향 패널의 동적 특성을 전달 행렬을 이용하여 표현하고 전달계수를 구하기 위하여 6×6 크기의 전체시스템 전달행렬을 2×2 크기의 전달행렬로 축약하여 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{pmatrix} p \\ v_x \end{pmatrix}_{x=0} = [\mathbf{T}^{ct}] \begin{pmatrix} p \\ v_x \end{pmatrix}_{x=L} \quad (4)$$

여기서, 기호 p 와 v_x 는 각각 음압과 체적 속도를 나타내며, 2×2 행렬 $[\mathbf{T}^{ct}]$ 는 전체길이가 L 인 다층/다물질 음향 패널의 축약된 전달행렬이다. 식 (3)의 전체시스템에 대한 축약 전달행렬을 이용하여 입사각 θ 에 대한 전달계수를 다음과 같이 구한다.

$$\tau(\theta) = \frac{2e^{jk_x L}}{T_{11}^{ct} + \frac{\cos \theta}{\rho_{air} c_{air}} T_{12}^{ct} + \frac{\rho_{air} c_{air}}{\cos \theta} T_{21}^{ct} + T_{22}^{ct}} \quad (5)$$

따라서, 음장입사 전달계수는 한계 입사각 θ_0 를 고려하여 다음의 식을 통하여 구할 수 있다.

$$\bar{\tau} = 2 \int_0^{\theta_0} |\tau(\theta)|^2 \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (6)$$

음장 입사에 대한 전달손실 최대화 문제를 정식화하기 위하여 음장 입사 전달계수를 최소화 시키기 위한 함수에 수렴도 향상을 위한 함수를 추가적으로 고려한 다목적 함수로 다음과 같이 구성하였다.

$$\min J = \left[W_1 \frac{\sum_{\omega=\omega_l}^{\omega_u} \bar{\tau}(\chi : \omega)}{\sum_{\omega=\omega_l}^{\omega_u} \bar{\tau}(\chi_0 : \omega)} + W_2 \frac{\chi^T (\mathbf{1} - \chi)}{\chi_0^T (\mathbf{1} - \chi_0)} \right] \quad (7)$$

최적화는 주파수 ω_l 와 ω_u 사이의 주파수 영역에서 수행할 수 있도록 하였고, 가중치 W_1 와 W_2 를 이용하여 목적함수의 거동을 제어하였다. 식 (7)의 목적함수를 산출하기 위하여 한계입사각을 $\theta_0 = 70^\circ$ 로 설정하였고 MMA (Method of Moving Asymptotes)를 최적화 프로그램으로 이용하였다. Figure 2에 보인

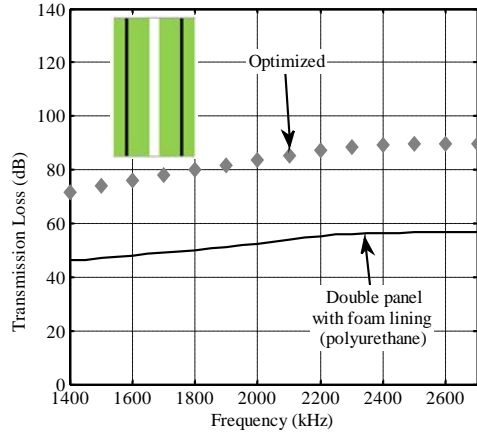


Figure 2 Field-incidence transmission loss of optimized multi-medium acoustic panel. In the considered frequency band, the optimization produced the double elastic panel (black) of which sides are wrapped by poroelastic layers (green). The optimized layering shows the unbonded layering by air (white) is more effective than the bonded layering for an acoustic isolation.

바 와 같이 세 개의 주파수 영역에서 최적화를 수행한 결과 가장 일반적으로 사용되는 이중 패널 구조에 비해 최적화된 다층/다물질 음향 패널이 고려된 모든 주파수 영역에서 월등히 향상된 차음 성능을 보임을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존의 방식으로는 접근이 어려운 다층/다물질 일차원 음향 차음벽을 설계함에 있어서 적용 가능한 최적 설계 기법을 제안하였다. 최적화 문제를 다룸에 있어서 보다 일반화된 접근을 위하여 음장 입사 조건을 부가하여 최적화 문제를 정식화 하고 공기, 탄성 및 탄성다공성 물질의 최적설계 문제에 적용함으로써 그 타당성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국 연구재단의 중견 연구자 지원 사업(과제번호: 2011-0017445)과 교육과학기술부 첨단비파괴 검사기술 사업(과제번호: 2011-0030113) 및 WCU(과제번호: R31-2010-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.